

A ORIGEM DOS SAIS NAS ÁGUAS NA FORMAÇÃO BARREIRAS E NO COMPLEXO GNÁISSICO-MIGMATÍTICO NOS MUNICÍPIOS NÃO COSTEIROS NA REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA/CE

Maria Aparecida Belém Fernandes^{1a}; Maria Marlúcia Freitas Santiago^{1b}, Josué Mendes Filho^{1c} & Horst Frischkorn²

Resumo – Análise hidroquímica de 107 amostras de água subterrânea, 36 armazenadas na Formação Barreiras e 71 no Complexo Migmatítico, em áreas estratégicas da Região Metropolitana de Fortaleza, os dados são discutidos sob aspectos de qualidade e origem dos sais. Em 42% dos poços, a condutividade elétrica estava acima de 1000 μ S/cm, a concentração de cloreto excedeu 250 mg/l em 34% e a concentração de sódio, 200 mg/L em 19%. Estas águas encontradas nos dois aquíferos. A metodologia empregada para interpretação dos resultados quanto a origem dos sais foi a Análise Fatorial, revelando a predominância de aerossóis de origem marinha, compostos, principalmente, por cloreto de sódio.

Abstract – Aiming at the quality assessment and an explanation for elevated salinity, hydrochemical analyses were performed on 107 groundwater samples originating from wells listed as strategic reserve, 36 from Barreiras Formation and 71 from the Migmatitic Complex. In 42% of the wells electric conductivity was higher than 1000 μ S/cm, chloride exceeded 250 mg/L in 34%, and sodium, 200 mg/L in 19%. The methodology for interpretation of the origin of salts is based on Factor Analysis and reveals that marine aerosol, composed mainly of sodium chloride, represents the main source.

Palavras-Chaves – Águas subterrâneas, análise fatorial R-modal, Região Metropolitana de Fortaleza.

¹Departamento de Física da UFC, Caixa Postal 6030, Cep. 60455-760, Tel.: (0xx) 85 3366.9913, Fax: (0xx) 85 3366.9450; e-mail: (a) maria@fisica.ufc.br, (b) marlucia@fisica.ufc.br; (c) josue@fisica.ufc.br

²Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da UFC, Tel.: (0xx) 85 3366 9775, Fax: (0xx) 85 3366 9627, e-mail: cariri@ufc.br.

INTRODUÇÃO

A Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) compreende apenas 2,4% do território do Ceará, mas concentra cerca de três milhões de habitantes (IBGE, 2002), que representam 40% de toda a população do Estado. Por isso, ela caracteriza-se como a aglomeração urbana mais expressiva do Ceará, que cresce desordenadamente. A crescente ocupação acarreta, como consequência, um aumento na demanda de água e no volume de água servida.

O abastecimento de água para o consumo humano requer além de quantidade uma qualidade dentro dos padrões para a proteção da saúde de seus consumidores. Dois aspectos devem ser levantados nestas águas: a presença de bactérias e de elementos dissolvidos.

A caracterização química da água tem sido intensivamente pesquisada nos últimos tempos. Trabalhos sobre os aspectos geológico, hidrogeoquímico e da qualidade de água vêm sendo realizados; a análise estatística multivariante tem sido uma ferramenta aplicada com muito êxito nesse tipo de estudo devido à elevada quantidade de parâmetros analisados. Destacam-se os trabalhos de Vidal *et al.* (2000), Locsey e Cox (2003), Lambrakis *et al.* (2004) e Invernizzi e Oliveira (2004). Este último sobre a água subterrânea do sistema hidroquímico da bacia do Mogi-Pardo, São Paulo. Estes trabalhos mostram que a aplicação de uma técnica estatística multivariante é uma ferramenta muito útil para a interpretação e o entendimento da variabilidade de um conjunto de dados hidroquímicos.

A análise fatorial R-modal minimiza o número de parâmetros estudados fazendo uma substituição de um número grande de variáveis, que são os dados originais, por um número menor de fatores significantes; cada um destes fatores é uma combinação linear dos parâmetros originais. Como resultado, se tem um número pequeno de fatores com as mesmas informações do conjunto de dados coletados. Nas últimas décadas esta técnica tem sido aplicada, com muito sucesso, como uma ferramenta no estudo de recursos hídricos, apesar de ter sido desenvolvida para estudos em ciências sociais.

Neste trabalho, são apresentados os resultados da análise fatorial R-modal aplicada a um conjunto de amostras de água subterrânea coletadas em parte dos municípios da Região Metropolitana de Fortaleza, armazenadas em dois diferentes sistemas aquíferos, o Complexo Migmatítico e a Formação Barreiras.

ÁREA DE ESTUDO

A Região Metropolitana de Fortaleza (Figura 1) está localizada entre os paralelos 465.000 e 586.000 Leste, e os meridianos 9.510.000 e 9.615.000 Norte (RMF, 2006). Esta região é constituída por treze municípios, dos quais nove serão abordados nesse trabalho.



Figura 1 – Localização geográfica da Região Metropolitana de Fortaleza.

Fonte: modificado de INPLANCE (1997). A área hachuriada é a área estudada.

O clima da região apresenta-se razoavelmente homogêneo com temperaturas médias variando entre 25,7 a 27,34°C. A estratigrafia da Região Metropolitana de Fortaleza é composta, geologicamente, por quatro formações principais: Complexo Migmatítico, Formação Barreiras, Paleodunas e Dunas. Os municípios destacados neste trabalho abrangem somente as Formações Complexo Migmatítico e Formação Barreiras.

Segundo Brandão (1994), o Complexo Migmatítico, de posicionamento estratigráfico no Proterozóico Inferior é a unidade que ocupa a maior área no âmbito da RMF. Suas melhores exposições são observadas na parte ocidental, onde se encontra uma seqüência predominantemente paraderivada, constituída de gnaisses aluminosos, em parte migmatizados e freqüentemente intercalados por níveis quartzíticos e carbonáticos. Os migmatitos ocorrem, em geral, intimamente associados aos demais litocomponentes da unidade.

A Formação Barreiras (Brandão, 1994), de idade miocênica superior a pleiocênica, distribui-se como uma faixa de largura variável acompanhando a linha de costa, à retaguarda dos sedimentos eólicos antigos e atuais; por vezes, aflora na linha de praia, formando falésias vivas. Na porção oriental da RMF, chega a penetrar até cerca de 30 km em direção ao interior, constituindo o trecho mais largo da faixa. Litologicamente é formada por sedimentos areno-argilosos, não ou pouco litificados, de coloração avermelhada, creme ou amarelada, muitas vezes de aspecto

mosqueado, com granulação variando de fina a média, contendo intercalações de níveis conglomeráticos. Seu caráter ambiental é predominantemente continental, e os sedimentos foram depositados sob condições de clima semi-árido, sujeito a chuvas esporádicas e violentas, formando amplas faixas de leques aluviais unidos. O aquífero Barreira, mesmo sendo de natureza sedimentar, apresenta um potencial variável em termos de água subterrânea, dada a heterogeneidade dos sedimentos que compõem esta unidade. Apresenta vazões da ordem de 20 a 30 m³/hora, até valores insignificantes de poucas centenas de litros por hora.

As rochas cristalinas ocorrem em quase 60% da área, caracterizando-se por apresentar normalmente baixa potencialidade hídrica, pois a ocorrência de água subterrânea nestes casos está condicionada à existência de fendas. Os poços que captam neste domínio têm vazões em torno de somente 2.000 L/h. Em adição, é alta a probabilidade de se encontrar água com elevado teor de sais, normalmente superior a 1000 mg/L, o que a torna imprópria para o consumo humano (Cardoso *et al.*, 2000).

METODOLOGIA

Áreas estratégicas de cada município, consideradas como sendo as que podem ser utilizadas no caso de desabastecimento público, foram identificadas através do projeto “Sistema de Monitoramento/Gestão de Água Subterrânea de Micro-Áreas Estratégicas da Região Metropolitana de Fortaleza” desenvolvido pelo Consórcio GOLDER/PIVOT (GOLDER/PIVOT, 2005).

As amostras coletadas no âmbito deste projeto foram analisadas no Laboratório de Hidroquímica do Departamento de Física da UFC, onde foram determinados 14 parâmetros: Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, K⁺, Fe⁺², Al⁺³, NH₄⁺, Cl⁻, SO₄⁼, HCO₃⁻, NO₃⁻ e NO₂⁻. As metodologias analíticas adotadas foram escolhidas segundo os procedimentos descritos no *Standard Methods* (APHA, 1992) e em Custodio e Llamas (1983). Os parâmetros condutividade elétrica (CE) e pH foram medidos em campo.

A Análise Estatística dos dados, com o programa WinSTAT for Excel (FITCH, 2002), foi feita seguindo forma: para a entrada de dados no programa, primeiro se escolhe as variáveis a serem analisadas, depois seleciona-se as opções comunalidade estimada, comunalidades calculadas, extração de fatores e rotação.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em cada uma de um conjunto de 107 amostras foram analisados 14 parâmetros, a Condutividade Elétrica (CE), pH e as concentrações dos cátions, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, K⁺, Fe⁺², Al⁺³,

NH₄⁺, e dos ânions, Cl⁻, SO₄⁼, HCO₃⁻, NO₃⁻ e NO₂⁻. Os resultados estão apresentados na Tabela 1, onde 36 poços são da Formação Barreiras e 71 do Complexo Migmatítico.

As amostras foram coletadas nos municípios de Chorozinho, Eusébio, Guaiúba, Horizonte, Itaitinga, Maracanaú, Maranguape, Pacajus e Pacatuba; a letra *a* que segue ao número do poço indica poços na Formação Barreiras e a letra *b* poços no Complexo Gnaíssico-Migmatítico. As localizações destes poços com as respectivas coordenadas podem ser encontradas em Fernandes (2007).

Em 42% das amostras a condutividade elétrica é acima de 1000 µS/cm, em 34% Cl⁻ excede o limite de potabilidade de 250 mg/l e em 19%, o sódio, de 200mg/L .

Tabela 1 – Concentração de íons e parâmetros físico-químicos em amostras da Formação Barreiras (a) e Complexo Migmatítico (b) de municípios pertencentes à Região Metropolitana de Fortaleza.

Poço	CE (µS/cm)	pH	Concentrações (mg/L)											
			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Fe ⁺²	Al ⁺³	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻
1 ^a	2590	6,7	53,1	106,8	228,5	24,7	0,07	0,02	0,00	813,5	1,5	46,4	13,8	0,05
2 ^a	866	7,6	17,8	24,8	101,2	13,0	0,05	0,01	0,00	195,5	3,6	80,5	38,8	0,05
3 ^a	5920	7,1	298,2	260,5	306,3	31,3	0,05	0,00	0,00	1902,9	33,5	246,5	4,7	0,05
4 ^a	5410	6,6	300,2	256,9	157,9	51,2	0,02	0,00	0,00	1722,7	21,5	168,4	32,2	0,07
5 ^a	6550	6,4	305,7	284,6	559,4	33,6	0,02	0,00	0,28	2137,0	6,6	139,1	13,5	0,05
6 ^a	2150	7,4	80,8	89,0	137,6	18,2	0,48	0,01	0,00	475,5	33,9	87,8	5,1	0,05
7 ^a	7190	7,5	295,0	358,2	520,9	35,9	0,09	0,11	3,98	2324,4	8,9	163,5	85,7	0,10
8 ^a	3150	6,8	136,2	154,9	184,2	22,5	0,19	0,00	0,00	927,5	7,2	136,7	27,9	0,05
9 ^a	3210	6,9	180,0	154,9	147,6	24,7	0,04	0,00	0,28	908,2	61,1	222,1	16,2	0,07
10 ^a	1067	6,8	39,6	38,0	102,7	7,9	0,06	0,01	0,34	228,1	12,5	126,9	45,1	0,10
11 ^a	708	6,0	16,6	24,5	53,9	20,3	0,05	0,01	0,00	120,1	26,5	39,0	65,4	0,06
12 ^a	1433	6,7	33,2	48,6	152,8	16,1	0,01	0,00	0,41	367,5	3,8	109,8	26,7	0,07
13 ^a	1331	7,2	9,5	19,2	226,4	9,9	0,00	0,00	0,00	318,7	21,1	185,5	4,0	0,06
14 ^a	344	6,8	16,6	10,6	31,6	9,9	0,09	0,03	0,28	37,7	12,8	65,9	33,6	0,10
15 ^a	432	6,9	0,0	6,0	88,0	4,9	0,32	0,00	0,07	52,9	32,1	129,3	3,6	0,06
16 ^a	805	6,3	7,1	10,6	126,7	7,9	0,60	0,00	0,28	170,0	27,5	134,2	6,7	0,06
17 ^a	652	7,0	30,5	21,9	75,5	7,9	0,00	0,00	0,14	106,9	4,9	217,2	2,7	0,05
18 ^a	1337	7,4	102,9	55,3	89,4	7,9	0,07	0,00	1,38	324,8	6,8	212,3	9,9	0,08
19 ^a	856	7,0	9,5	14,9	135,3	11,9	0,05	0,00	0,14	153,7	10,5	234,3	4,2	0,05
20 ^a	615	5,5	4,7	12,0	90,9	9,9	0,06	0,10	0,96	106,9	5,6	17,1	68,5	0,08
21 ^a	448	6,2	9,5	11,3	67,6	5,9	0,08	0,00	0,00	90,6	2,3	95,2	06,7	0,06
22 ^a	501	6,3	15,8	18,7	55,1	7,9	0,78	0,00	0,83	98,7	2,7	114,7	8,7	0,07
23 ^a	345	7,2	4,7	3,4	72,9	4,9	0,54	0,01	0,14	40,7	11,9	100,1	28,6	0,07
24 ^a	242	6,9	3,2	2,4	79,1	2,9	0,08	0,00	0,07	14,2	24,3	85,4	8,7	0,06
25 ^a	666	6,9	11,9	16,8	145,7	7,9	0,06	0,00	0,28	178,7	4,4	153,7	6,3	0,06
26 ^a	2800	6,9	244,4	125,2	92,3	5,9	0,02	0,00	0,83	785,0	8,2	302,6	9,1	0,06
27 ^a	3640	6,7	254,5	148,9	157,9	11,9	0,02	0,00	0,00	1002,8	14,9	314,8	58,2	0,06
28 ^a	3680	6,8	255,7	151,5	173,5	8,9	0,04	0,00	0,00	1002,8	14,5	314,8	57,0	0,07
29 ^a	1061	6,4	29,7	38,4	88,0	11,9	0,03	0,00	0,00	250,9	3,7	129,3	13,8	0,06
30 ^a	5440	6,6	306,1	215,3	216,9	18,2	0,06	0,00	0,14	1650,4	14,2	183,0	41,0	0,09
31 ^a	3370	6,6	216,3	138,0	152,7	11,9	0,06	0,00	0,00	908,0	12,8	253,8	46,2	0,06
32 ^a	187	6,7	1,5	2,4	21,7	5,9	0,05	0,01	0,55	24,9	11,9	24,4	20,8	0,06
33 ^a	1097	6,2	20,3	32,7	110,3	7,9	2,30	0,00	0,00	283,5	4,3	107,4	7,0	0,06
34 ^a	1244	6,2	42,5	42,7	105,7	7,9	0,02	0,00	0,00	329,5	1,1	100,1	13,2	0,06
35 ^a	310	6,1	6,2	7,6	32,6	2,9	0,10	0,02	0,00	59,4	2,5	63,4	9,6	0,07
36 ^a	409	6,3	11,3	17,3	28,5	5,9	0,67	0,00	0,00	58,4	0,9	139,1	4,2	0,05

Tabela 1 – Continuação.

Poço	CE ($\mu\text{S/cm}$)	p H	Concentrações (mg/L)											
			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Fe ₂ ⁺	Al ³⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻
37 ^b	479	7,3	11,1	20,4	30,5	4,9	0,09	0,0	0,0	75,2	16,2	68,3	9,6	0,03
38 ^b	885	8,2	42,8	62,5	36,8	3,9	0,03	0,0	0,0	144,1	8,1	240,4	18,5	0,03
39 ^b	536	7,9	21,4	19,0	48,0	4,9	0,04	0,0	0,0	103,2	6,1	104,9	15,4	0,05
40 ^b	379	6,4	3,5	5,6	68,9	4,9	0,18	0,0	0,0	34,0	29,2	92,7	4,4	0,04
41 ^b	343	7,4	0,0	6,0	62,5	7,9	0,03	0,1	0,0	29,1	43,2	80,5	4,2	0,04
42 ^b	197	6,7	18,2	5,2	15,3	3,9	2,01	0,0	0,0	25,5	1,9	80,5	4,4	0,04
43 ^b	1873	7,4	19,0	35,3	300,0	15,0	0,07	0,0	0,0	441,9	56,9	275,8	6,7	0,04
44 ^b	364	6,7	9,1	9,5	42,3	13,0	0,05	0,0	0,0	44,9	20,3	73,2	17,6	0,04
45 ^b	613	6,5	25,7	19,2	78,2	7,9	0,03	0,0	0,0	69,2	32,8	173,3	19,6	0,04
46 ^b	268	5,8	8,3	8,2	31,6	7,9	0,03	0,0	0,0	43,7	11,3	36,6	17,4	0,03
47 ^b	737	7,4	28,1	22,0	90,9	9,9	0,04	0,0	0,0	95,9	36,4	168,4	25,4	0,03
48 ^b	896	7,0	7,1	26,6	108,5	11,9	0,05	0,0	0,0	246,5	2,2	17,1	11,4	0,04
49 ^b	778	6,5	29,3	29,4	89,4	7,9	0,05	0,0	0,0	134,8	23,4	148,9	20,8	0,04
50 ^b	527	4,8	5,5	12,3	75,5	7,9	0,08	0,0	0,0	129,9	13,1	22,0	13,2	0,04
51 ^b	4500	8,0	93,8	168,1	538,9	3,9	0,13	0,0	0,0	123,5	19,4	412,5	5,3	0,07
52 ^b	632	7,1	19,0	14,4	95,2	1,9	0,28	0,0	0,0	102,5	12,5	175,7	4,5	0,05
53 ^b	10320	7,2	267,3	369,3	1875,5	7,9	5,62	0,0	0,0	3361,8	46,7	615,0	34,0	0,04
54 ^b	2300	7,2	26,1	45,7	341,5	1,9	1,83	0,0	0,0	535,2	39,9	328,3	15,7	0,07
55 ^b	905	8,1	31,7	65,4	75,5	3,9	0,19	0,0	0,21	91,3	21,4	274,6	38,2	0,06
56 ^b	1288	5,8	99	23,1	144,0	11,9	0,13	0,0	0,0	333,2	7,7	46,4	30,6	0,07
57 ^b	1118	7,1	53,0	34,6	110,3	7,9	0,05	0,0	0,0	211,7	56,2	166,0	30,9	0,04
58 ^b	608	6,6	17,4	18,3	67,6	7,9	0,05	0,0	0,0	86,4	37,1	86,6	49,2	0,04
59 ^b	619	6,2	14,2	22,9	65,0	10,9	0,00	0,0	0,0	105,6	41,8	48,8	33,2	0,03
60 ^b	577	5,8	9,4	14,5	79,7	5,9	1,47	0,0	0,62	123,4	5,7	58,6	31,2	0,09
61 ^b	656	6,2	11,8	15,0	96,2	4,9	0,05	0,0	0,76	124,4	13,9	82,0	18,2	0,07
62 ^b	655	6,4	12,5	17,6	87,9	4,9	0,04	0,0	1,03	141,7	3,4	68,3	22,3	0,07
63 ^b	1156	6,7	30,6	29,1	142,8	5,9	1,56	0,0	1,31	240,1	30,5	148,9	13,5	0,08
64 ^b	272	5,7	7,8	8,1	28,8	7,9	0,26	0,0	1,10	36,6	23,6	48,8	13,2	0,07
65 ^b	287	5,7	12,5	4,8	37,7	1,9	0,23	0,0	0,62	45,3	10,5	41,5	17,1	0,08

66 ^b	665	6,2	19,6	17,6	81,1	5,9	0,04	0,0	0,76	132,1	32,0	73,2	18,8	0,07
67 ^b	784	6,4	29,4	17,9	93,4	7,9	0,18	0,0	0,90	166,8	34,3	85,4	11,4	0,07
68 ^b	521	6,0	17,3	15,7	56,6	3,9	0,13	0,0	0,55	112,8	26,5	51,2	4,7	0,08
69 ^b	706	6,2	19,6	20,2	83,8	7,9	0,12	0,0	0,62	128,2	25,2	78,1	40,3	0,03
70 ^b	1225	6,0	29,8	38,1	132,8	11,9	0,01	0,0	0,76	246,8	21,4	85,4	70,8	0,08
71 ^b	826	6,8	45,1	23,6	86,5	5,9	0,06	0,0	0,90	155,2	9,8	178,2	12,7	0,02
72 ^b	1043	6,5	45,1	28,8	113,6	6,9	1,46	0,0	0,55	247,8	15,0	131,8	6,7	0,05
73 ^b	501	5,4	9,4	12,6	67,9	1,9	0,05	0,1	1,03	113,8	7,4	26,8	22,0	0,06
74 ^b	1261	7,1	48,6	41,2	138,4	11,9	0,07	0,0	1,24	208,3	29,2	187,9	73,5	0,06
75 ^b	908	6,8	23,5	26,2	109,2	8,9	0,12	0,0	1,38	238,2	8,6	46,4	6,7	0,03
76 ^b	427	5,7	7,0	6,9	70,5	8,9	0,07	0,0	0,76	74,2	15,0	61,0	18,5	0,02
77 ^b	443	6,2	10,2	13,3	55,4	4,9	1,19	0,0	1,24	95,9	7,5	51,2	8,9	0,03
78 ^b	668	6,8	29,0	19,8	73,1	8,9	0,10	0,0	1,51	89,7	22,8	11,0	43,2	0,15
79 ^b	724	6,8	9,4	5,2	65,0	1,0	0,30	0,0	0,55	42,1	40,6	63,4	4,2	0,07
80 ^b	258	6,5	11,7	7,1	29,5	1,9	0,23	0,0	0,62	41,2	4,9	78,1	5,8	0,07
81 ^b	258	6,4	8,6	3,9	18,9	5,9	0,41	0,0	0,55	39,3	6,8	58,6	6,5	0,07
82 ^b	262	6,5	13,6	6,1	28,5	3,9	0,67	0,0	0,21	41,2	5,9	82,0	4,7	0,08
83 ^b	299	6,8	15,6	9,0	21,7	1,9	0,71	0,0	0,28	46,0	2,8	97,6	4,9	0,08
84 ^b	325	6,7	22,6	7,6	30,5	1,9	1,71	0,0	1,24	44,0	5,7	122,0	8,7	0,08
85 ^b	320	6,7	21,1	6,6	23,6	5,9	4,01	0,0	0,28	44,0	6,0	112,3	7,4	0,09
86 ^b	304	6,5	19,1	8,8	19,8	3,9	4,44	0,0	0,41	42,1	3,0	107,4	10,1	0,09
87 ^b	543	6,5	29,3	13,5	44,5	5,9	0,09	0,0	0,00	69,9	28,9	173,3	7,4	0,07
88 ^b	437	6,5	44,5	9,9	23,6	5,9	0,29	0,0	0,28	49,8	7,4	180,6	8,7	0,08
89 ^b	327	6,4	17,2	9,0	23,6	7,9	0,92	0,0	0,21	49,8	6,2	109,8	6,5	0,08
90 ^b	2760	7,8	81,8	120,6	179,8	78,8	0,05	0,0	0,76	665,7	31,5	246,5	17,4	0,23

Tabela 1 – Continuação.

Poço	CE (µS/cm)	pH	Concentrações (mg/L)											
			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Fe ²⁺	Al ⁺³	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻
91 ^b	5350	6,9	272,5	262,3	255,4	99,0	0,01	0,00	0,28	1490,4	17,9	434,4	15,5	0,51
92 ^b	5010	7,6	232,7	207,5	285,2	182,1	0,05	0,01	2,41	1306,5	24,8	346,6	31,6	0,79
93 ^b	11010	6,6	566,0	692,9	400,9	99,0	0,99	0,01	8,87	3737,4	29,7	246,5	15,4	3,97
94 ^b	2720	7,4	83,4	72,9	236,0	18,2	3,20	0,02	1,03	734,7	25,3	185,5	10,5	0,09
95 ^b	8082	7,1	289,1	327,8	923,2	14,0	0,55	0,00	0,90	2475,2	154,7	417,3	34,6	0,08
96 ^b	3126	6,7	79,4	124,0	336,5	29,1	0,08	0,00	0,76	732,8	105,0	187,9	114,2	1,87
97 ^b	6127	6,9	188,3	180,0	823,9	18,2	0,02	0,00	0,76	1785,8	131,8	410,0	5,3	0,07
98 ^b	9542	6,9	378,9	455,1	127,6	9,9	0,09	0,00	0,69	3065,3	175,9	373,4	46,2	0,08
99 ^b	1104	6,6	36,5	36,7	135,3	9,9	0,19	0,00	6,77	184,2	22,4	297,7	7,2	0,19
100 ^b	507	6,9	29,0	16,4	50,5	2,9	0,07	0,00	0,90	67,5	15,0	168,4	5,3	0,07
101 ^b	4240	6,8	215,0	140,6	446,1	14,0	0,08	0,00	0,55	1023,0	165,6	461,3	24,2	0,09
102 ^b	383	6,5	14,1	12,1	46,9	1,9	0,05	0,00	0,76	54,0	12,5	122,0	5,6	0,08
103 ^b	1709	7,6	19,0	36,6	236,2	3,9	0,09	0,00	0,00	362,3	59,2	141,5	7,8	0,04
104 ^b	689	6,0	11,9	16,8	104,2	3,9	1,12	0,04	0,00	190,9	9,5	9,7	5,6	0,04
105 ^b	1136	6,9	40,0	34,4	92,9	3,9	0,05	0,00	0,00	234,6	29,3	200,1	11,0	0,04
106 ^b	7250	7,4	47,5	184,0	1175,4	9,9	0,20	0,00	0,00	2092,2	38,7	510,1	65,1	0,10
107 ^b	1670	7,5	33,2	48,1	189,0	1,9	0,15	0,00	0,00	296,2	53,0	361,2	23,2	0,08

Na Formação Barreiras a CE das águas variou de 187 a 6550 µS/cm e no Complexo Migmatítico, de 197 a 11010 µS/cm Considerando os limites de concentração nas águas potáveis de Cl⁻ (250 mg/L) Na⁺ (200 mg/L) e NO₃⁻ (45 mg/L), verifica-se que o cloreto é o íon que mais ultrapassa o limite como se pode verificar na Tabela 2 Os histogramas das Figuras 2 e 3 mostram a distribuição dos valores de CE na Formação Barreiras e no Complexo Migmatítico.

Tabela 2 – Número de amostras com concentrações iônicas acima do limite para águas potáveis

(Fonte: Portaria 518, FUNASA, 2004).

Amostras	Formação Barreiras	Complexo Migmatítico
Total	36	71
Com Cl ⁻ > 250 mg/L	19	17

Com Na+ > 200 mg/L	06	14
Com NO3- > 45 mg/L	07	06
Com CE > 1000 μ S/cm	20	25

O histograma com a distribuição da condutividade elétrica na Formação Barreiras (figura 2) mostra que apenas 16 (44%) amostras analisadas se encontram dentro dos limites de potabilidade considerados pelo Ministério da Saúde (1000 μ S/cm). 46 amostras (65%) coletadas no Complexo Migmatítico (Figura 3) satisfazem a condição. Pode-se constatar, portanto, que, sob este critério de potabilidade, 58% dos poços fornecem água apropriada para o consumo humano.

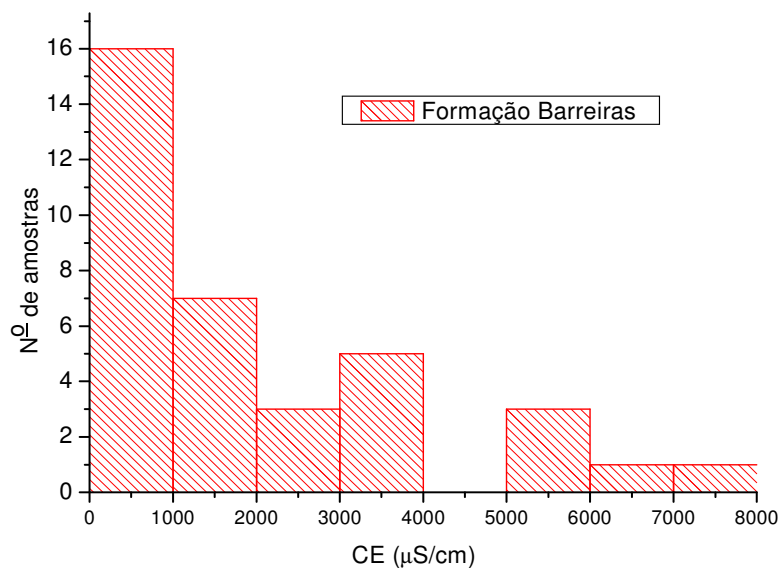


Figura 2 – Histograma da Condutividade Elétrica em águas da Formação Barreiras.

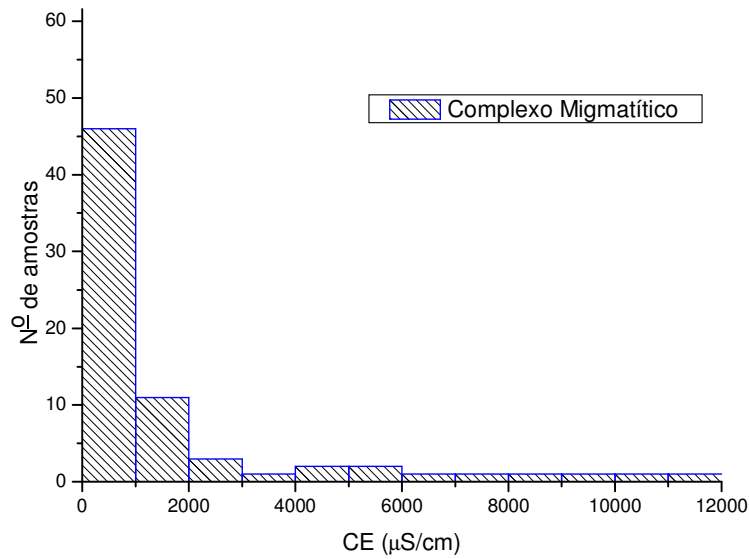


Figura 3 – Histograma da Condutividade Elétrica em águas do Complexo Migmatítico.

A Figura 4 mostra a regressão linear entre cloreto e sódio e a condutividade elétrica em amostras da Formação Barreiras. Pode ser observado que o cloreto apresenta bem correlacionado com a condutividade (com inclinação aproximada de $[1 \text{ meq/L}]/(100 \text{ } \mu\text{S/cm})$) enquanto que o sódio só apresenta correlação para valores menores que $1000 \text{ } \mu\text{S/cm}$. Este resultado mostra que a salinidade das águas está ligada a outros íons.

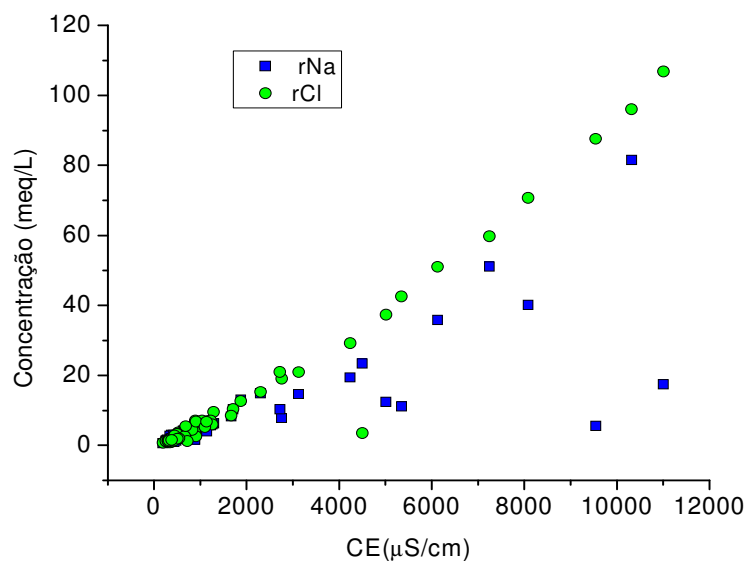


Figura 4 – Concentrações de cloreto e sódio *versus* Condutividade Elétrica em águas da Formação Barreiras.

Os valores das concentrações de cloreto e sódio versus condutividade elétrica em amostras coletadas no Complexo Migmatítico estão apresentados na Figura 5. Observa-se novamente a boa relação linear entre Cl^- e CE até salinidade muito alta das águas, enquanto Na^+ atinge um tipo de saturação quando CE excede 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

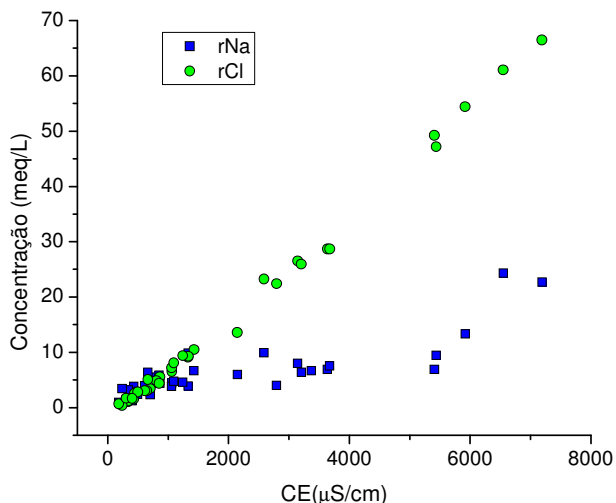


Figura 5 – Concentrações de cloreto e sódio *versus* Condutividade Elétrica em águas do Complexo Migmatítico.

Águas de elevada salinidade aparecem nos dois tipos de aquíferos e são predominantemente cloretadas sódicas, indicando que, neste caso, o tipo de aquífero não é o fator dominante sobre a salinidade das águas. Para identificar outros fatores determinantes das concentrações salinas usou-se análise fatorial R-modal nos dois conjuntos de dados, provenientes, respectivamente, da Formação Barreiras e o do Complexo Migmatítico.

A análise fatorial utilizada neste conjunto de medidas foi feita pelo método do centróide e de rotação Varimax. Os resultados obtidos incluem fatores dominantes, variáveis e valores de comunalidade, que é a proporção da variância total de uma variável explicada pelos fatores totais. Estes resultados são interpretados a partir de valores apresentados nas Tabelas 3 e 4 e dos gráficos das cargas fatoriais principais projetados no plano bidimensional mostrados nas Figuras 6 e 7.

A análise fatorial das amostras coletadas na Formação Barreiras resultou em dois fatores responsáveis por 57,42% da variância total das variáveis indicadas na Tabela 3 e na Figura 6. Estes fatores são:

Fator 1: CE Cl^- Mg^{++} Ca^{++} Na^+ K^+ , HCO_3^- .

Fator 2: Al^{+3} NH_4^+ NO_3^- , NO_2^- .

O Fator 1 representa os aerossóis de origem marinha; a presença de bicarbonato acompanhado de cálcio e magnésio é indício de dissolução dos carbonatos de cálcio e magnésio. O

Fator 2 é representado principalmente pela presença de alumínio, decorrente do intemperismo de aluminossilicato, e pelos íons nitrogenados amônia, nitrato e nitrito, indicativos de águas contaminadas pela falta de saneamento nos centros urbanos.

Tabela 3 – Cargas fatoriais após a rotação Varimax de amostras coletadas da Formação Barreiras.

Variáveis	Fator 1	Fator 2	Comunalidade
CE(μ S/cm)	0,98	0,21	1,00
Cl ⁻	0,97	0,23	1,00
Mg ⁺⁺	0,97	0,25	1,00
Ca ⁺⁺	0,94	0,10	0,89
Na ⁺	0,76	0,28	0,66
K ⁺	0,74	0,19	0,59
HCO ₃ ⁻	0,53	-0,22	0,33
pH	0,30	-0,03	0,09
SO ₄ ⁼	0,26	-0,15	0,09
Fe ⁺²	-0,23	-0,11	0,06
Al ⁺³	-0,03	0,93	0,86
NH ₄ ⁺	0,21	0,74	0,60
NO ₃ ⁻	0,21	0,66	0,48
NO ₂ ⁻	0,00	0,62	0,39
Soma dos quadrados das cargas fatoriais	5,42	2,62	8,04
Variância (%)	38,73	18,69	57,42

A análise fatorial dos poços localizados na Formação Geológica Complexo Migmatítico resultou em dois fatores responsáveis por 57,4% da variância total das variáveis indicadas na Tabela 4. Estes fatores são:

Fator 1: Na⁺ HCO₃⁻ CE Cl⁻ Mg⁺⁺ Ca⁺⁺ SO₄⁼, pH.

Fator 2: NO₂⁻ NH₄⁺ Ca⁺⁺ Mg⁺⁺ K⁺ Cl⁻, CE.

O Fator 1 representa, da mesma maneira como no caso anterior, os aerossóis marinhos compostos principalmente de cloreto de sódio e traz traços de dissolução de carbonatos de cálcio e magnésio, devido a presença de bicarbonato, cálcio e magnésio relacionado ao pH. O Fator 2 está vinculado à contaminação pela presença de nitrito e de amônia, e também traz traços de aerossóis marinhos com presença de potássio.

Tabela 4 – Cargas fatoriais após a rotação Varimax de amostras coletadas do Complexo Migmatítico.

Variáveis	Fator 1	Fator 2	Comunalidade
Na ⁺	0,92	0,12	0,86
HCO ₃ ⁻	0,86	0,16	0,76
CE(μ S/cm)	0,84	0,54	1,00

Cl ⁻	0,80	0,57	0,96
SO ₄ ⁼	0,66	0,09	0,44
pH	0,42	-0,01	0,17
NO ₃ ⁻	0,27	0,11	0,09
Al ⁺³	-0,24	-0,01	0,06
Fe ⁺²	0,17	0,02	0,03
NO ₂ ⁻	0,02	0,88	0,77
NH ₄ ⁺	-0,08	0,78	0,61
Ca ⁺⁺	0,61	0,75	0,93
Mg ⁺⁺	0,66	0,73	0,97
K ⁺	0,14	0,60	0,38
Soma dos quadrados das cargas fatoriais	4,53	3,51	8,04
Variância (%)	32,37	25,04	57,40

CONCLUSÕES

Nos poços escolhidos como reservas estratégica, 42% das águas têm salinidade elevada, com CE > 1000 µS/cm, em 34% o cloreto e em 19% sódio excedem o limite recomendado para águas potáveis.

O mesmo tipo químico de água foi encontrado na Formação Barreiras e no Complexo Migmatítico, indicando que, na área, o tipo de aquífero não é determinante no processo de salinização.

Com a análise fatorial R-modal pode-se identificar os aerossóis marinhos como principal contribuição de cloreto de sódio e da dissolução de rochas carbonatadas como fonte de bicarbonato de cálcio e magnésio nas águas dos dois aquíferos.

Também é significativa a contribuição da dissolução de aluminossilicatos e a contaminação dos dois aquíferos por compostos nitrogenados.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES e à FUNCAP (Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHA. Standard Methods For the examination of water and wastewater. 18 ed., AWWA – WPCP 1992.

BRANDÃO, R. L. Sistema de Informações para Gestão e Administração Territorial da Região Metropolitana de Fortaleza - Projeto SINFOR: Diagnóstico Geoambiental e os Principais Problemas de Ocupação do Meio Físico da Região Metropolitana de Fortaleza. CPRM, Fortaleza, 100p, 1994.

CARDOSO, E. F. *et al.* Plano de Gerenciamento de Água das Bacias Metropolitanas. Fortaleza: VBA Consultores S/C Ltda, 2000.

CUSTODIO, E. & LLAMAS, M. R. **Hidrología subterránea**. Ediciones Omega, Barcelona, 2 ed. 1157 p, 1983.

FERNANDES, M. A. B. Análise estatística R-modal e modelo geoquímico inverso no estudo da qualidade da água subterranean na Região Metropolitana de Fortaleza-Ce. Tese (Doutorado em Física). Fortaleza, 2007. 150f.

FITCH, R. K. User's Manual to WinSTAT[®] for Excel. Copyright by R. Fitch Software, 117p. 2002.

FUNASA (Fundação Nacional de Saúde). Portaria no 518 do Ministério de saúde, Brasília. 2004. Disponível em http://www.springway.com.br/agua_contaminação_fisico.htm. Acesso em dezembro de 2006.

GOLDER/PIVOT. Sistema de Monitoramento/Gestão de Água Subterrânea de Micro-Áreas Estratégicas da Região Metropolitana de Fortaleza. Relatório Final do Projeto. VII Volumes. 2005.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Dados sobre os censos desenvolvidos no Brasil desde 1980 até 2002. IBGE, Rio de Janeiro, Brasil. 2002.

INPLANCE (Instituto de Planejamento do Ceará). Atlas do Ceará Governo do Estado do Ceará .Secretaria de Planejamento e Coordenação – SEPLAN. 65 p. 1997.

INVERNIZZI, A. L. & OLIVEIRA, S. M. B. Hydrochemical characterization of a watershed through factor analysis. **Revista Água Subterrânea** 18, 67-77, 2004.

LAMBRAKIS, N., ANTONAKOS, A., PANAGOPOULOS, G. The use of multicomponent statistical analysis in hydrogeological environmental research. **Water Research** 38, 1862-1872, 2004.

LOCSEY, K. L. & COX, M. E. Statistical and hydrochemical methods to compare basalt- and basement rock-hosted groundwaters: Atherton Tablelands, north-eastern Australia. **Environmental Geology** 43, 698-713, 2003.

RMF (Região Metropolitana de Fortaleza). Disponível em http://pt.wikipedia.org/wiki/Região_Metropolitana_de_Fortaleza>. Acesso em dezembro de 2006.

VIDAL, M., MELGAR, J., LÓPEZ, A., SANTOALLA, M. C. Spatial and temporal hydrochemical changes in groundwater under the contaminating effects of fertilizers and wastewater. **Journal of Environmental Management** 60, 215-225, 2000.